

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE LIOFILIZACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, CONTENIDO DE PECTINA Y CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE CIRUELA (*Spondias purpurea* L.)

EFFECT OF FREEZE-DRYING CONDITIONS ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES, PECTIN CONTENT, AND REHYDRATION CAPACITY OF PLUM SLICES (*Spondias purpurea* L.)

Cinthia Muñoz-López¹, Galo R. Urrea-García¹, Maribel Jiménez-Fernández²,
Guadalupe del C. Rodríguez-Jiménez³, Guadalupe Luna-Solano^{1*}

¹Instituto Tecnológico de Orizaba. Oriente 9 no. 852, Orizaba, Veracruz, México. P. O. Box 324. (gluna@itorizaba.edu.mx). ²Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Veracruzana. Apartado Postal 572. 91192. Xalapa, Veracruz, México. ³Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos del Instituto Tecnológico de Veracruz. M.A. de Quevedo. 2779. 91987. Veracruz, Veracruz, México.

RESUMEN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es originaria del sur de México y América Central, se clasifica como fruto exótico y es un alimento con potencial de exportación por su contenido nutricional y sabor. Su comercialización es limitada porque se daña aceleradamente en post-cosecha. La liofilización es una alternativa para industrializar este fruto y prolongar su vida de anaquel; pero, la calidad de los productos liofilizados depende de las condiciones de operación. El objetivo de este estudio fue evaluar las condiciones de liofilización en las propiedades fisicoquímicas, contenido de pectina y rehidratación de rodajas de ciruela ecotipo betabel y amarilla. El diseño experimental fue en arreglo factorial al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue una muestra de ciruela de cada ecotipo. Las muestras se congelaron a -5 y -20 °C (Tc) y se liofilizaron a 0.05 y 0.1 mbar (Pr) en condiciones de laboratorio. Pr tuvo efecto significativo en el contenido de humedad en ambos ecotipos, con valores menores a $0.02 \text{ g H}_2\text{O g s}^{-1}$. Tc afectó significativamente la actividad de agua. La luminosidad aumentó con respecto a la fruta fresca con el decremento de Tc. La liofilización no afectó significativamente el contenido de pectina. La correlación entre Tc, Pr y rehidratación de las rodajas de ciruela betabel no fue significativa. Tc tuvo efecto significativo en las muestras rehidratadas (agua a 30 °C) en la ciruela amarilla, y debilitó la estructura de la matriz sólida. La liofilización es un método fiable para deshidratar ciruela, con calidad alta para rehidratación, adecuada para conservar y

ABSTRACT

The Mexican plum (*Spondias purpurea* L.)—classified as an exotic fruit—is native to southern Mexico and Central America. It has export potential due to its nutritional content and taste. Its commercialization is limited because it is highly sensitive to physical damage during postharvest. Freeze-drying is an alternative that allows the industrialization of this fruit and extends its shelf life; but the quality of lyophilized products depends on the operating conditions. The objective of this study was to evaluate the effect of freeze-drying conditions on the physicochemical properties, pectin content, and rehydration of plum slices (beetroot and yellow ecotypes). The experimental design was a factorial randomized arrangement with three replications. The experimental unit was a plum sample from each ecotype. Samples were frozen at -5 and -20 °C (Tc) and lyophilized at 0.05 and 0.1 mbar (Pr) under laboratory conditions. Pr had a significant effect on the moisture content in both ecotypes, with values lower than $0.02 \text{ g H}_2\text{O g s}^{-1}$. Tc significantly affected water activity. Luminosity increased with respect to fresh fruit as Tc decreased. Freeze-drying did not have a significant effect on pectin content. The correlation between Tc, Pr, and rehydration of beetroot plum slices was not significant. Tc had a significant effect on the rehydrated samples (water at 30 °C), and weakened the structure of the solid matrix of the yellow plum. Freeze-drying is a reliable method to dehydrate plums, with high-quality rehydration, suitable for preservation and a diversified use as snacks, or as an additional ingredient for cereals, yoghurt, and bakery products.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: noviembre, 2016. Aprobado: agosto, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 1-13. 2018.

Key words: *Spondias purpurea* L., freeze-drying, rehydration, pectin, color.

diversificar su consumo como bocadillos, agregada a cereales, yogur y productos de panadería.

Palabras clave: *Spondias purpurea* L., liofilización, rehidratación, pectina, color.

INTRODUCCIÓN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es una especie frutal, de la familia de las Anacardiáceas, nativa de América Central y México. El fruto es una drupa elipsoidal y oviforme, con masa y tamaño que oscilan entre 4.0 y 43.2 g y 2 y 5 cm (Alia-Tecajal *et al.*, 2012). La pulpa es carnosa, con sabor dulce-ácido y color intenso; este, en dependencia de la variedad, puede ser amarillo, verde o rojo violáceo. La ciruela contiene vitamina C y minerales, como calcio, fósforo e hierro, y compuestos fenólicos, responsables de su actividad antioxidante, y su efecto laxante suave se debe a que contiene sorbitol y fibra soluble (principalmente pectina) e insoluble (Vargas-Simón *et al.*, 2011).

Actualmente se cultiva en 22 estados de la república mexicana (SIAP, 2015), por lo que es la especie más cultivada del género *Spondias*. Este fruto tropical, como otros es altamente perecedero y su consumo se restringe por su estacionalidad; su deterioro rápido es común por invasión de microorganismos después de la cosecha y se debe, en parte, a su contenido de humedad (>78 %) (Osuna *et al.*, 2011).

El incremento de la demanda por productos que conserven sus calidad ha aumentado. Para la industria esto implica desarrollar operaciones que minimicen los efectos adversos (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011). La deshidratación es una de las operaciones unitarias más empleada en la industria de los alimentos y los productos deshidratados pueden consumirse directamente o como ingredientes en alimentos procesados (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011; Fijalkowska *et al.*, 2015).

La liofilización es uno de los métodos más avanzado para secar los productos con valor nutrimental alto en la industria alimentaria, pues impide la contracción indeseable y produce porosidad alta, preserva las cualidades nutricionales, sabor, aroma y color; además, permite la rehidratación adecuada (Lombraña, 2009; Sánchez-Santillán *et al.*, 2016). La aplicación industrial de la liofilización está limitada porque es un método caro. Por esto, el interés por determinar

INTRODUCTION

The Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) belongs to the Anacardiaceae family, and it is native to Central America and Mexico. This species of fruit has an ellipsoidal and oviform drupe, with a mass and size ranging between 4.0 and 43.2 g, and 2 and 5 cm, respectively (Alia-Tecajal *et al.*, 2012). The pulp is fleshy, with a sweet-acid taste, and vivid color, which—depending on the variety—can be yellow, green, or red-violet. The plum is a source of vitamin C and minerals—such as calcium, phosphorus, and iron—, as well as phenolic compounds—which are responsible for its antioxidant activity; it has a light laxative effect, as a result of its sorbitol and soluble (mainly pectin) and insoluble fiber content (Vargas-Simón *et al.*, 2011).

Currently, Mexican plum is grown in 22 Mexican states (SIAP, 2015), making it the most cultivated species of the *Spondias* genus. Like other tropical fruits, it is highly perishable and its consumption is restricted by its seasonality; its rapid deterioration is commonly caused by the invasion of microorganisms during the postharvest stage, and is partially caused by its moisture content (>78 %) (Osuna *et al.*, 2011).

The demand for products that preserve their quality has increased. For the industry, this implies developing operations that minimize the adverse effects (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011). Dehydration is one of the most common unit operations used in the food industry, and dehydrated products can be consumed directly or as ingredients in processed foods (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011; Fijalkowska *et al.*, 2015).

Freeze-drying is one of the most advanced methods in the food industry to dry products with high nutritional value. This method prevents undesirable contraction, produces high porosity, and preserves the nutritional qualities, flavor, aroma, and color. In addition, it enables an adequate rehydration of the product (Lombraña, 2009; Sánchez-Santillán *et al.*, 2016). The industrial application of freeze-drying is limited, because it is an expensive method. Therefore, the industry has become increasingly interested in determining the effect of the processing conditions in the freeze-drying time, the production, and the quality of the final product (Liapis and Bruttini, 2006). The quality of lyophilized products

el efecto de las condiciones del procesamiento en el tiempo de liofilización, la producción y la calidad del producto final ha aumentado (Liapis y Bruttini, 2006). La calidad de los productos liofilizados se afecta por la presión, la temperatura de la placa de calentamiento, la calidad de la materia prima y la velocidad de congelación (Hammami y René, 1997; Shishegarha *et al.*, 2002). La congelación previa a la liofilización es determinante en las propiedades del producto seco, dado que influye directamente en el tamaño y forma de los poros producido después de la liofilización (Kasper y Friess, 2011). El estudio de las cinéticas de sublimación y curvas clásicas de secado puede ser útil para determinar los mecanismos de transferencia limitantes y optimizar las etapas de liofilización (Hottot *et al.*, 2007; Adhami *et al.*, 2013).

En la literatura hay información sobre la liofilización de frutos tropicales, pero no de ciruela mexicana. La liofilización de ciruela es una alternativa para industrializarla y comercializarla, ya que es altamente precedera. Condiciones del proceso, como la temperatura de congelación y presión de vacío, podrían afectar las propiedades fisicoquímicas de la ciruela y pérdida en la calidad del producto. El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de la temperatura de congelación y presión en la cinética de secado, por liofilización, de rodajas de ciruela mexicana y en las cualidades del producto final.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de las muestras

Los frutos del estudio fueron de ciruela mexicana, ecotipo 'betabel' y 'amarilla', del área de producción de Coscomatepec, Veracruz, México. De acuerdo al color de la cáscara, al momento del corte, seleccionamos los frutos; los de ciruela betabel permanecían con 30 % de color verde y 70 % rojo y la ciruela amarilla mostraba 75 % de color amarillo. Las ciruelas se lavaron y seccionaron en rodajas de 2.5 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor, con cortador de acero inoxidable. Las rodajas se seccionaron paralelas al eje axial de la fruta. Todas las pruebas se realizaron en triplicado.

Condiciones de liofilización

Las rodajas se congelaron (T_c) a $-20\text{ }^\circ\text{C}$, por 180 min, en un ultra congelador (congelación rápida) y a $-5\text{ }^\circ\text{C}$, por 2880 min

is affected by pressure, temperature of the heating plate, quality of the raw material, and freezing speed (Hammami and René, 1997; Shishegarha *et al.*, 2002). Freezing prior to freeze-drying is determinant of the properties of the dry product, because it directly influences the size and shape of the pores produced after freeze-drying (Kasper and Friess, 2011). The study of sublimation kinetics and classical drying curves can be useful to determine the limiting transfer mechanisms and optimize the freeze-drying stages (Hottot *et al.*, 2007; Adhami *et al.*, 2013).

There are studies about freeze-drying tropical fruits, but not about Mexican plum. Plum is highly perishable; therefore, freeze-drying is an alternative for its industrialization and commercialization. Process conditions, such as freezing temperature and vacuum pressure, could affect the physicochemical properties of the plum and result in product quality loss. The objective of this research was to determine the influence of the freezing temperature and pressure in the freeze-drying kinetics of Mexican plum slices and the qualities of the final product.

MATERIALS AND METHODS

Sample preparation

Mexican plum ecotypes ('beetroot' and 'yellow')—from the Coscomatepec, Veracruz, Mexico production area— were chosen for this study. Fruits were selected according to the color of the peel when they were cut: 'beetroot' ecotype showed 30 % green and 70 % red, and 'yellow' ecotype showed 75 % yellow. The plums were washed and cut with a stainless-steel cutter into 2.5 cm wide and 0.5 cm thick slices. The slices were cut parallel to the axial axis of the fruit. All tests were carried out in triplicate.

Freeze-drying conditions

The slices were frozen (T_c) at $-20\text{ }^\circ\text{C}$, during 180 min, in an ultra-freezer (fast freezing) and $-5\text{ }^\circ\text{C}$, during 2,880 min (slow freezing), in a domestic freezer (DAEWOO Mod FR-62R, Korea). The frozen samples were dehydrated during 360 min, in a laboratory freeze dryer (LABCONCO 2.5 L-Mod 742002, USA), with space for 12 flasks, which are attached to the valves of the drying chamber with stainless steel adapters and a condensed moisture collector. The drying kinetics were carried out with 0.05 and 0.1 mbar vacuum pressure (P_r) at $-85\text{ }^\circ\text{C}$ in the condenser.

(congelación lenta), en un congelador doméstico (DAEWOO Mod FR-62R, Korea). Las muestras congeladas se deshidrataron por 360 min, en un liofilizador (LABCONCO 2.5 L-Mod 742002, USA) para laboratorio, con espacio para 12 matraces, que se unen a las válvulas de la cámara de secado con adaptadores de acero inoxidable y recolector de humedad condensada. Las cinéticas de secado se realizaron con presión de vacío (Pr) de 0.05 y 0.1 mbar y $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el condensador. Las muestras se removieron en periodos específicos para evaluar los cambios de humedad, actividad de agua y color.

Determinaciones físicas y químicas

El contenido de humedad se determinó en 1 g de muestra, en una termobalanza de halógeno (MB35 HALOGEN, OHAUS, Switzerland), a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$; los resultados los expresamos en base seca ($\text{g H}_2\text{O g s}^{-1}$). La actividad de agua (a_w) de las rodajas de ciruela durante la liofilización se determinó a $25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un medidor de actividad de agua (Aqualab, series 3 TE, DECAGON; Washington, EUA).

Las propiedades ópticas de la ciruela fresca y liofilizada las analizamos por reflectancia con un colorímetro (HunterLab, model MiniScan XE plus; Hunter Associates Laboratory Retson, VA, USA). El colorímetro se calibró con estándares blanco y negro. Con la escala de Hunter medimos los parámetros L^* (luminosidad) y cromaticidad a^* (verde-rojo) y b^* (azul-amarillo). Con base en estos parámetros calculamos *Hue* (ángulo de matiz), *Chroma* (saturación de color) y ΔE (diferencia total de color). Las expresiones matemáticas para estos parámetros son (Guiné y Barroca, 2012):

$$Hue = \arctan b^* / a^*$$

$$Chroma = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\Delta E = \left[(L^* - L_o^*) + (a^* - a_o^*)^2 + (b^* - b_o^*)^2 \right]^{1/2}$$

donde: L^* , a^* , b^* son los valores de la muestra de ciruela liofilizada en tiempos diferentes y L_o^* , a_o^* , b_o^* son los parámetros de color de la muestra fresca.

Grado de rehidratación

Entre 0.5 y 0.6 g de producto deshidratado se sumergieron en 150 mL de agua destilada, a 10 y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 60 min. La rehidratación de las muestras la evaluamos a los 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 min (Reyes *et al.*, 2008) con el registro de su peso, después de eliminar el líquido de la superficie con papel absorbente. La rehidratación también la evaluamos en leche entera,

The samples were removed at specific periods, in order to evaluate moisture, water activity, and color changes.

Physical and chemical determinations

The moisture content was determined in 1 g of sample, in a Moisture Analyzer with Halogen Lamp (MB35 HALOGEN, OHAUS, Switzerland), at $65\text{ }^{\circ}\text{C}$; the results were expressed in terms of dry basis ($\text{g H}_2\text{O g s}^{-1}$). The water activity (a_w) of the plum slices during freeze-drying was determined at $25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ using a water activity meter (Aqualab, series 3 TE, DECAGON; Washington, USA).

The optical properties of fresh and lyophilized plums were analyzed based on their reflectance, using a colorimeter (HunterLab, model MiniScan XE plus; Hunter Associates Laboratory Retson, VA, USA). The colorimeter was calibrated using black and white standards. Parameters L^* (luminosity) and chromaticity a^* (green-red) and b^* (blue-yellow) were measured using the Hunter scale. Based on these parameters, *Hue* (hue angle), *Chroma* (color saturation), and ΔE (total color difference) were calculated. According to Guiné and Barroca (2012), the mathematical expressions for these parameters are as follows:

$$Hue = \arctan b^* / a^*$$

$$Chroma = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\Delta E = \left[(L^* - L_o^*) + (a^* - a_o^*)^2 + (b^* - b_o^*)^2 \right]^{1/2}$$

where: L^* , a^* , b^* are the values of the lyophilized plum sample in different times, and L_o^* , a_o^* , b_o^* are the color parameters of the fresh sample.

Degree of rehydration

Between 0.5 and 0.6 g of dehydrated product were submerged in 150 mL of distilled water, at 10 and $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, for 60 min. Sample rehydration was evaluated at 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, and 60 min (Reyes *et al.*, 2008), recording their weight, after removing the liquid from the surface with absorbent paper. Rehydration was also evaluated in whole milk, taking into account that dehydrated plums may be mixed with cereals. Whole and pasteurized milk were obtained in a local supermarket. The equation used to calculate rehydration was:

$$RR(\text{g g}^{-1}) = m2 / m1$$

where: $m1$ is the dry sample mass (g) and $m2$ is the rehydrated slice mass (g) (Zhang *et al.*, 2015).

por la probabilidad de mezclar la ciruela deshidratada con cereales. La leche entera y pasteurizada se obtuvo en un supermercado local. La ecuación para calcular la rehidratación fue:

$$RR(g\ g^{-1}) = m2 / m1$$

donde: $m1$ es la masa de la muestra seca (g) y $m2$ es la masa de la rodaja rehidratada (g) (Zhang *et al.*, 2015).

Contenido de pectina

La pectina se extrajo de las rodajas de ciruela con el método descrito por Kliemann *et al.* (2009), con algunas modificaciones. A 5 ± 0.01 g de muestra triturada en mortero se les adicionaron 100 mL de agua destilada, el pH se ajustó a 2.5 con ácido cítrico y se calentó 1 h a $90\ ^\circ\text{C}$, con agitación continua. El extracto caliente se filtró a través de un lienzo. Al filtrado se le agregó un volumen igual de etanol, se dejó reposar 2 h y la pectina floculada se separó por filtración, se deshidrató en horno hasta obtener su peso constante. El rendimiento de la pectina se obtuvo con la ecuación:

$$Y_{pec}(\%) = 100\left(\frac{P}{B_i}\right)$$

donde: Y_{pec} es el rendimiento del extracto de pectina en porcentaje, P es la cantidad de extracto de pectina en g y B_i es la cantidad inicial de la muestra en g.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue factorial, con dos factores y dos niveles: temperatura de congelación (-5 y $-20\ ^\circ\text{C}$) y presión (0.05 y 0.1 mbar), completamente al azar y con tres repeticiones. La unidad experimental fue una muestra de ciruela de cada ecotipo. Los resultados se presentan como medias de las variables y su desviación estándar. Los resultados se analizaron con ANDEVA y se consideraron significativos cuando $p \leq 0.05$. Los análisis se realizaron con Minitab Realese 6.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas de cambio de humedad

La humedad inicial de los ecotipos betabel y amarilla fue 78 y 85 %. Las curvas de secado mostraron efecto significativo ($p \leq 0.05$) de la presión de liofilización en ambos ecotipos. La humedad fue menor o igual a $0.0206\ \text{g H}_2\text{O g s}^{-1}$, al final del proceso, con

Pectin content

Pectin was extracted from the plum slices using the method described by Kliemann *et al.* (2009), with some modifications. One-hundred mL of distilled water were added to 5 ± 0.01 g of sample crushed in mortar; citric acid was added to achieve a 2.5 pH; finally, the sample was heated for 1 h at $90\ ^\circ\text{C}$, with continuous stirring. The heated extract was filtered through a cheesecloth. An equal volume of ethanol was added to the filtered sample and let stand for 2 h. The flocculated pectin was separated by filtration and was dehydrated in an oven, until its constant weight was obtained. The pectin yield was obtained using the following equation:

$$Y_{pec}(\%) = 100\left(\frac{P}{B_i}\right)$$

where: Y_{pec} is the yield of pectin extract (in percentage), P is the amount of pectin extract in g, and B_i is the initial amount of sample in g.

Experimental design and statistical analysis

The experimental design was factorial, with two factors and two levels: freezing temperature (-5 and $-20\ ^\circ\text{C}$) and pressure (0.05 and 0.1 mbar); it was completely random and included three repetitions. The experimental unit was a sample of each plum ecotype. The results are presented as means of the variables and their standard deviation. The results were analyzed using ANOVA and were considered significant when $p \leq 0.05$. All the analysis were carried out with Minitab Realese 6.

RESULTS AND DISCUSSION

Moisture change curves

The initial moisture of beetroot and yellow ecotypes was 78 and 85 %, respectively. The drying curves showed that freeze-drying pressure had a significant effect ($p \leq 0.05$) in both ecotypes. At the end of the process, moisture was lower or equal to $0.0206\ \text{g H}_2\text{O g s}^{-1}$, with 0.1 mbar. Moisture values were statistically lower than 0.05 mbar (Figure 1).

The slices of beetroot plums frozen at $-5\ ^\circ\text{C}$ and lyophilized with 0.05 and 0.1 mbar showed the greatest loss of moisture, at 60 and 120 minutes, respectively. In slices frozen at $-20\ ^\circ\text{C}$ and lyophilized at 0.1 and 0.05 mbar, the moisture decreased in the first 60 min and 180 min, respectively; nevertheless, the moisture in all treatments stabilized at 300 min (Figure 1A).

0.1 mbar y los valores de humedad fueron estadísticamente menores que con 0.05 mbar (Figura 1).

La pérdida mayor de humedad de las rodajas de ciruela betabel congeladas a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y liofilizadas con 0.05 y 0.1 mbar se presentó a partir de los 60 y 120 min. En las rodajas congeladas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y liofilizadas a 0.1 y 0.05 mbar la humedad disminuyó en los primeros 60 min y de los 180 min, y en todos los tratamientos se estabilizó a los 300 min (Figura 1A).

La disminución de la humedad en ciruela amarilla (Figura 1B) se presentó a partir de los 60 min, en todas las condiciones evaluadas; pero, con 0.1 mbar y congelación a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se estabilizó a los 240 min y a los 300 min en los otros tratamientos. En todos los tratamientos hubo dos periodos de aceleración y desaceleración de pérdida de humedad. Pei *et al.* (2014) señalaron que el periodo de aceleración puede atribuirse al área mayor de sublimación durante la primera etapa del secado, y se reduce gradualmente al continuar el proceso porque incrementa la resistencia para la transferencia de masa. El efecto de la temperatura de congelación en la humedad final de las rodajas no fue significativo. Sin embargo, en la ciruela amarilla se observó que la congelación lenta provocó sublimación rápida, probablemente porque los cristales de hielo eran más grandes en comparación con la congelación rápida. Estos resultados son similares a los reportados por Reyes *et al.* (2011) y Ceballos *et al.* (2012) en rebanadas de manzana y guanábana,

Moisture decreased in yellow plum (Figure 1B) after 60 min, under all conditions evaluated; however, with 0.1 mbar and freezing at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, moisture stabilized at 240 min; finally, at 300 min, it stabilized in the other treatments. In all the treatments, there were two acceleration and deceleration periods of moisture loss. Pei *et al.* (2014) noted that the acceleration period may be attributed to the greater sublimation area during the first stage of drying, and that it is gradually reduced as the process continues, because it increases the mass-transfer resistance. The effect of freezing temperature in the final moisture of the slices was not significant. However, slow freezing caused rapid sublimation of yellow plums, probably because the ice crystals were larger compared to fast freezing. These results are similar to those reported by Reyes *et al.* (2011) and Ceballos *et al.* (2012) in apple and soursop slices, respectively. These authors found that small pores generated narrow roads with greater resistance to water flow.

Water activity change curves

The a_w of the beetroot plum slices (Figure 2A), lyophilized with both pressures, decreased significantly from 180 min, and was lower when the tissue was frozen at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. In contrast, the a_w of the yellow plum decreased (Dunnett's test $p=0.05$) after 120 min, with pressures and freezing at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; also,

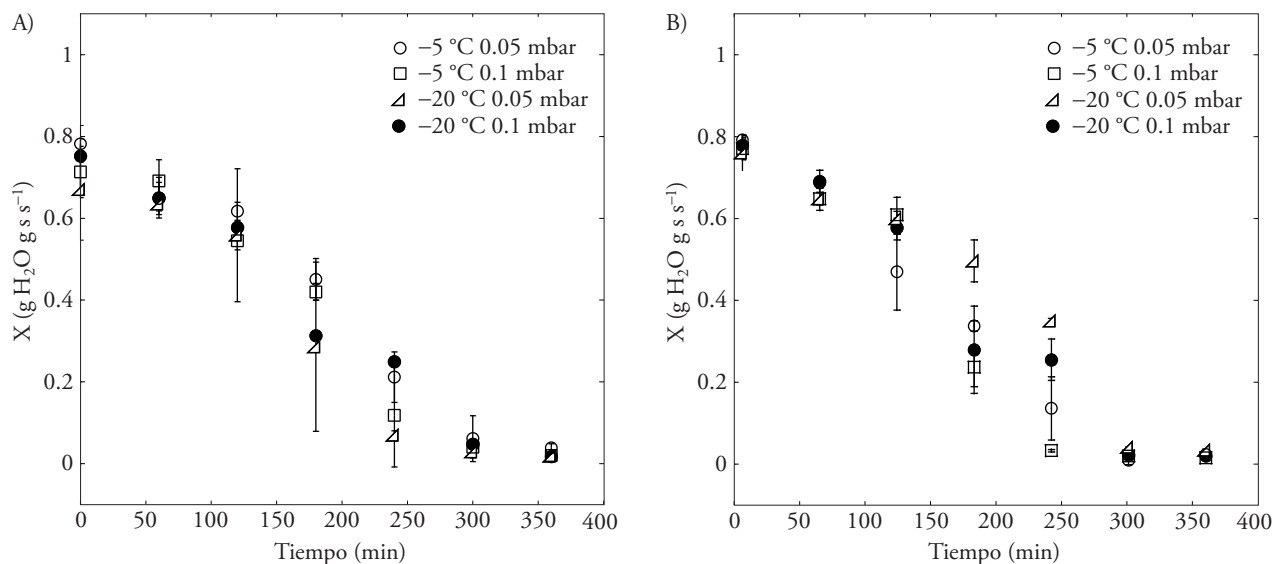


Figura 1. Cambio de la humedad de rodajas de ciruela (*Spondias purpurea* L.): A) betabel y B) amarilla durante la liofilización. Figure 1. Moisture change in plum slices (*Spondias purpurea* L.): A) beetroot and B) yellow, during freeze-drying.

respectivamente. Estos autores encontraron que los poros pequeños generaron caminos estrechos con resistencia mayor al paso del agua.

Curvas de cambio de actividad de agua

La a_w de las rodajas de ciruela betabel (Figura 2A) liofilizadas con ambas presiones disminuyó significativamente a partir de los 180 min, y fue menor cuando el tejido se congeló a -20 °C. En contraste, a_w de la ciruela amarilla disminuyó (Prueba de Dunnett $p=0.05$) a partir de los 120 min, con presiones y congelación a -5 °C; además con congelación a -20 °C el decremento inició a partir de los 60 y 180 min con la menor y mayor presión (Figura 2B).

Todas las rodajas de ciruela alcanzaron a_w menor a 0.5 a partir de los 300 min. Esto indicó que el crecimiento microbiano es poco probable. Los valores de equilibrio de a_w en las rodajas de ciruela betabel liofilizada fueron 0.275 a 0.381 y los de ciruela amarilla fueron entre 0.249 y 0.275. Así, a_w en el equilibrio disminuyó significativamente con el decremento de la temperatura de congelación de ambos tipos de ciruela ($p=0.05$). En el caso de fármacos, durante la congelación lenta, el soluto puede concentrarse con el avance de la congelación y formar una capa vítrea, casi impermeable, en la superficie del material; esto dificulta el transporte de vapor de agua a través de los poros (Kasper y

with freezing at -20 °C, the decrease started from 60 and 180 min, with the lower and higher pressure, respectively (Figure 2B).

All plum slices were lower than 0.5 a_w from 300 min. This indicated that microbial growth is unlikely. The a_w balance values in lyophilized beetroot plum slices ranged between 0.275 and 0.381, and those of yellow plum, between 0.249 and 0.275. In this way, a_w balance decreased significantly as the freezing temperature fell for both plum types ($p=0.05$). In the case of drugs, during slow freezing, as freezing advances, the solute concentrates and it forms a glassy (almost waterproof) layer on the material's surface; this obstructs the flow of steam water through the pores (Kasper and Friess, 2011). Marques *et al.* (2007) observed that the decrease of a_w in the freeze-drying of acerola depended on the freezing process, which produces different porous structures.

Analysis of color

Beetroot fresh plum showed 16.24 L^* and this value did not change in lyophilized samples, after freezing at -5 °C. In contrast, freezing at -20 °C increased luminosity (Table 1). L^* is defined as the flux of light in a given direction, and depends on the number and orientation of the surfaces that reflect light. Therefore, the freezing speed affects the luminosity of lyophilized samples. Fast freezing

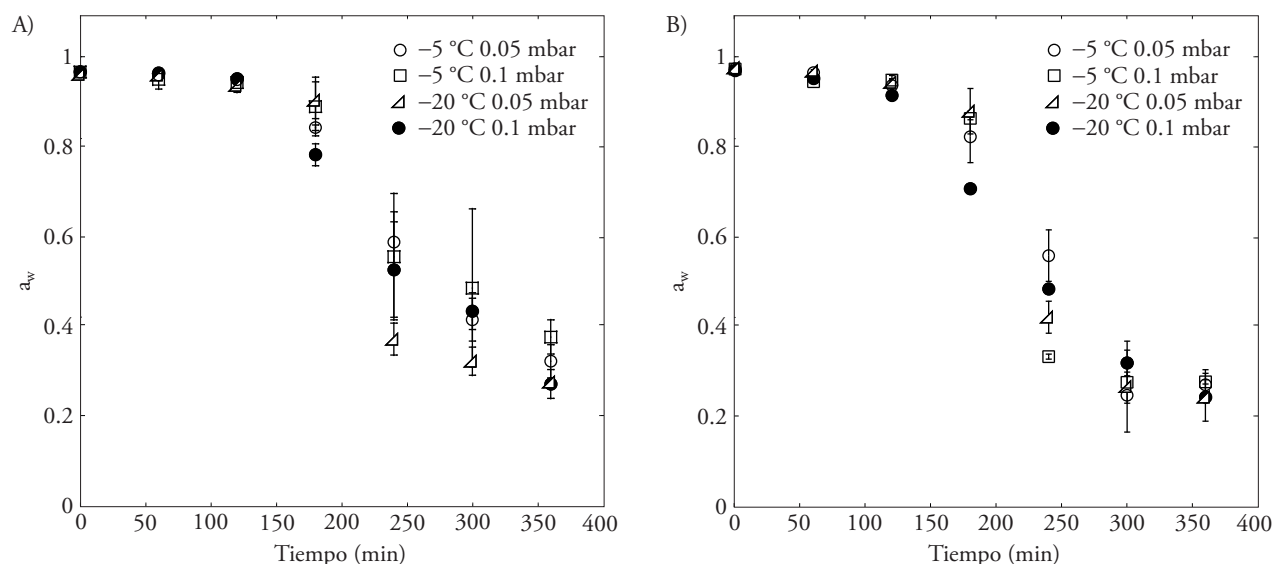


Figura 2. Actividad de agua de las rodajas de ciruela (*Spondias purpurea* L.): A) betabel y B) amarilla durante la liofilización.
Figure 2. Water activity of plum slices (*Spondias purpurea* L.): A) beetroot and B) yellow, during freeze-drying.

Friess, 2011). Marques *et al.* (2007) observaron que la disminución de a_w en la liofilización de acerola dependió del proceso de congelación, que produce estructuras porosas distintas.

Análisis de color

L^* en la ciruela betabel fresca fue 16.24 y no cambió en las muestras liofilizadas, después de congelarse a $-5\text{ }^\circ\text{C}$. En contraste la congelación a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ incrementó la luminosidad (Cuadro 1). L^* se define como el flujo de luz en una dirección dada y depende del número y la orientación de las superficies reflectantes de la luz. Así, la velocidad de congelación afecta la luminosidad de las muestras liofilizadas. La congelación rápida genera cristales pequeños y orientados al azar, por lo que la luminosidad de los productos congelados rápidamente es mayor que la de productos congelados lentamente (Ceballos *et al.*, 2012).

Los valores de *Chroma* y del ángulo *Hue* de la ciruela betabel liofilizada no mostraron diferencias significativas respecto a las rodajas frescas. Esto indica estabilidad de las antocianinas, que son pigmentos relacionados con el color rojo de las frutas. Al respecto, Beaudry *et al.* (2004) y Franceschinis *et al.* (2015) al liofilizar arándanos y cerezas observaron que los frutos mantuvieron tonalidad roja alta porque las antocianinas se preservaron en comparación con los tratamientos térmicos que las oxidan y degradan el color. La diferencia total de color (ΔE) en las rodajas fue significativamente diferente ($p \leq 0.05$) al de las rodajas de ciruela betabel sin procesar (Figura 3). Esto se debió principalmente a que la liofilización incrementó la luminosidad de la muestra, y por lo tanto afectó el valor de ΔE .

generates small randomly-positioned crystals; therefore, the luminosity of quickly frozen products is higher than that of slowly frozen products (Ceballos *et al.*, 2012).

The *Chroma* and *Hue* angle values of lyophilized beetroot plum did not show significant differences regarding fresh slices. This indicates that anthocyanins—pigments related to the red color of fruits—are stable. Beaudry *et al.* (2004) and Franceschinis *et al.* (2015) lyophilized cranberries and cherries, and observed that those berries still possessed an intense red shade, because their anthocyanins were preserved, while thermal treatments brown them and dull their color. The overall color difference (ΔE) in the slices was significant ($p \leq 0.05$) with regard to the beetroot plum unprocessed slices (Figure 3). Since the freeze-drying increased the luminosity of the sample, the value of ΔE was affected.

L^* of lyophilized yellow plum increased significantly in comparison with fresh fruit; lower freezing temperature produced a greater increase (Table 2). These results are similar to those obtained with carrots and asparagus (Reyes *et al.*, 2008; Jokic *et al.*, 2009).

Chroma increased with freeze-drying. This shows that carotenoids were concentrated in the tissue. Results are similar to those observed in mashed mango, in which β -carotenes increased with freeze-drying, compared to samples dried with convective heat transfer (Caparino *et al.*, 2012). The initial *Hue* angle value in yellow plum was 101.41° ; this is found in the yellow/green region ($90\text{--}180^\circ$ *Hue*). However, the shade of the slices decreased (*Hue* angle $< 90^\circ$). This was due to the negative-to-positive variation of the a^* parameter, possibly as a result of the enzymatic browning caused by mechanical damage when the fruit was cut.

Cuadro 1. Color de rodajas de ciruela betabel (*Spondias purpurea* L.) antes y después de liofilizarse.
Table 1. Color of beetroot plum (*Spondias purpurea* L.) slices, before and after freeze-drying.

| | | Tc ($^\circ\text{C}$) | Pr (mbar) | L^* | Chroma | Hue | ΔE |
|-----------------|--------------|-------------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ciruela betabel | fresca | | | 16.24 ^a | 17.41 ^a | 16.58 ^a | - |
| | liofilizadas | -5 | 0.05 | 19.98 ^{ab} | 20.17 ^a | 17.87 ^a | 4.67 ^a |
| | | -5 | 0.1 | 22.26 ^{ab} | 20.23 ^a | 17.70 ^a | 6.66 ^{ab} |
| | | -20 | 0.05 | 26.02 ^b | 23.72 ^a | 12.17 ^a | 11.74 ^b |
| | | -20 | 0.1 | 26.3 ^b | 23.54 ^a | 15.22 ^a | 11.79 ^b |

^{a,b} Tratamientos con letra distinta en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). ^{a,b} Treatments with a different letter in the same column are statistically different ($p \leq 0.05$).

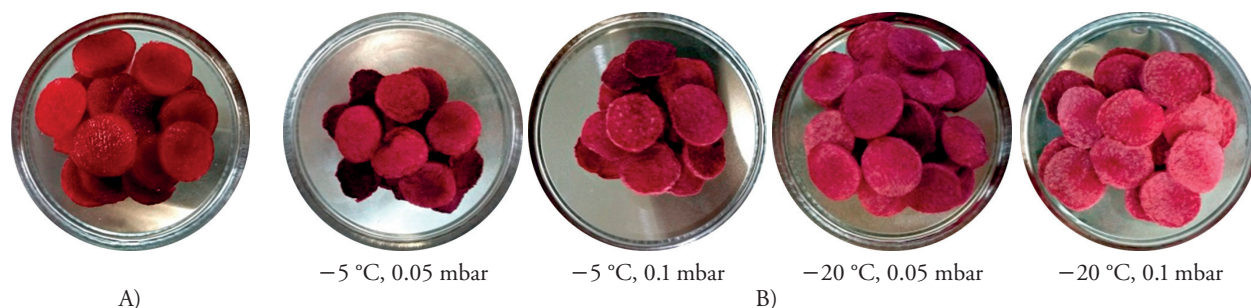


Figura 3. Color de rodajas de ciruela betabel (*Spondias purpurea* L.): A) fresca y B) liofilizada.
Figure 3. Color of beetroot plum (*Spondias purpurea* L.) slices: A) fresh and B) lyophilized.

L^* de la ciruela amarilla liofilizada incrementó significativamente en comparación con el fruto fresco; el incremento fue mayor con la temperatura de congelación menor (Cuadro 2). Estos resultados son similares a los obtenidos con zanahorias y espárragos (Reyes *et al.*, 2008; Jokic *et al.*, 2009).

El *Chroma* aumentó con la liofilización. Esto indica que los carotenoides se concentraron en el tejido. Los resultados son similares a lo observado en puré de mango, en el cual β -carotenos aumentaron con la liofilización, comparado con muestras secadas con calor convectivo (Caparino *et al.*, 2012). El valor inicial del ángulo *Hue* en la ciruela amarilla fue 101.41° , este se encuentra en la región de color amarillo/verde (*Hue* entre 90° y 180°). Pero la tonalidad de las rodajas disminuyó (ángulo *Hue* $< 90^\circ$). Esto se debió a la variación del parámetro a^* , de negativo a positivo, posiblemente por el pardeamiento enzimático que se causa por el daño mecánico durante el corte de la fruta.

ΔE mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos de ciruela amarilla. Lo anterior

ΔE showed significant differences ($p < 0.05$) between yellow plum treatments. This was due to the high luminosity of the samples and a slight shift of *Hue* towards the red shades (Figure 4).

Pectin content

There were no significant differences ($p > 0.05$) in pectin content (y_{pec}) between treatments: the freezing temperature or vacuum pressure did not affect the polysaccharide content of the samples (Table 3).

High pressures can compress the raw material and modify its surface; as a result, the following actions take place: the chemical reactions are balanced, while the solvent penetration is accelerated, and its diffusion in the food is sped up. The results were similar to those reported by Guo *et al.* (2012) and Naghshineh *et al.* (2013) who applied high vacuum to lime and orange peels. The use of high vacuum to obtain ingredients from medicinal herbs and the food matrix increases the extraction of bioactive compounds (Xi, 2009; Huang *et al.*, 2013).

Cuadro 2. Color de las rodajas de ciruela amarilla (*Spondias purpurea* L.) antes y después de su procesamiento.
Table 2. Color of yellow plum (*Spondias purpurea* L.) slices, before and after their processing.

| | | T _c (°C) | Pr (mbar) | L^* | <i>Chroma</i> | <i>Hue</i> | ΔE |
|------------------|-------------|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Ciruela amarilla | fresca | | | 19.95 ^a | 7.89 ^a | 101.41 ^a | - |
| | liofilizada | -5 | 0.05 | 53.53 ^b | 18.83 ^b | 85.00 ^b | 35.49 ^a |
| | | -5 | 0.1 | 55.01 ^b | 21.57 ^b | 86.81 ^b | 37.78 ^b |
| | | -20 | 0.05 | 52.84 ^b | 17.51 ^b | 91.90 ^{ab} | 34.32 ^c |
| | | -20 | 0.1 | 58.45 ^c | 20.63 ^b | 87.14 ^b | 40.68 ^d |

^{a,b,c,d} Tratamientos con letra distinta en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). ^{a,b,c,d} Treatments with a different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

se debió a la luminosidad alta de las muestras y a un desplazamiento ligero de *Hue* hacia los tonos rojos (Figura 4).

Contenido de pectina

Entre los tratamientos no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido de pectina (y_{pec}), es decir la temperatura de congelación o presión de vacío no afectaron el contenido del polisacárido de las muestras (Cuadro 3).

Las presiones altas pueden causar compresión en la materia prima y modificar su superficie; como resultado, se promueve el equilibrio de las reacciones químicas, la penetración acelerada de los disolventes y la velocidad de su difusión en el alimento. Los resultados fueron similares a los reportados por Guo *et al.* (2012) y Naghshineh *et al.* (2013) con alto vacío en cáscaras de lima y naranja. El empleo de alto vacío para obtener ingredientes de hierbas medicinales y de

Rehydration of lyophilized Mexican plum

The rehydration ratio (RR) measures the structural damage and the reconstitution properties of fruits and vegetables that have undergone a drying process. The RR of lyophilized beetroot plum was not affected by the conditions of the process (Table 4).

Beetroot plum slices kept the structure required to recover their original size during rehydration. The rehydrating medium seems to have spread properly in the uniform and porous structure, as well as in the cell walls, without damaging the slice. The RR was greater in water than in milk, probably as a result of the higher viscosity of the latter, although it can be a source of solids whose nutritional importance can be transported to the rehydrated product (Marín *et al.*, 2006). However, the RR values in milk (2.42-2.94 g g^{-1}) of the beetroot plum slices were greater than those reported by Shih *et al.* (2008) in strawberry slices (less than 2 g g^{-1}).

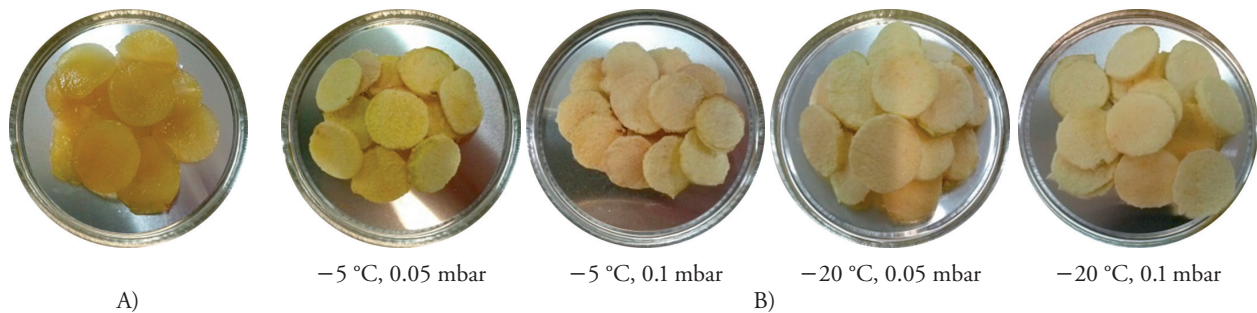


Figura 4. Color de rodajas de ciruela amarilla (*Spondias purpurea* L.): A) fresca y B) liofilizada.
Figure 4. Color of yellow plum (*Spondias purpurea* L.) slices: A) fresh and B) lyophilized.

Cuadro 3. Contenido de pectina en rodajas de ciruela (*Spondias purpurea* L.) liofilizada.
Table 3. Pectin content in lyophilized plum slices (*Spondias purpurea* L.).

| Ciruela liofilizada | Tc (°C) | Pr (mbar) | y_{pec} (% b.s.) |
|---------------------|---------|-----------|--------------------|
| betabel | -5 | 0.05 | 2.60 ^a |
| | -5 | 0.10 | 2.89 ^a |
| | -20 | 0.05 | 1.95 ^a |
| | -20 | 0.10 | 3.81 ^a |
| amarilla | -5 | 0.05 | 2.20 ^a |
| | -5 | 0.10 | 3.23 ^a |
| | -20 | 0.05 | 2.13 ^a |
| | -20 | 0.10 | 3.73 ^a |

Tratamientos con letra distinta en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). ❖
Treatments with a different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

la matriz de alimentos incrementa la extracción de los compuestos bioactivos (Xi, 2009; Huang *et al.*, 2013).

Rehidratación de la ciruela mexicana liofilizada

El grado de rehidratación (RR) se considera una medida del daño estructural y de las propiedades de reconstitución de las frutas y vegetales debido al proceso de secado. RR de la ciruela betabel liofilizada no se afectó por las condiciones del proceso (Cuadro 4).

Las rodajas de ciruela betabel mantuvieron la estructura necesaria para recobrar su tamaño original durante la rehidratación. El medio rehidratante parece que se difundió adecuadamente en la estructura uniforme y porosa y en las paredes celulares sin dañar la rodaja. RR fue mayor cuando el medio rehidratante fue agua, en comparación con la leche. Esto se debió probablemente a la viscosidad mayor de esta última. Aunque, esta puede representar fuente de sólidos con importancia nutritiva transportables al producto rehidratado (Marín *et al.*, 2006). Sin embargo, los valores de RR en leche (2.42-2.94 g g⁻¹) de las rodajas de ciruela betabel fueron mayores que los reportados por Shih *et al.* (2008) con rodajas de fresa (menor a 2 g g⁻¹).

Las rodajas liofilizadas de ciruela amarilla desprendieron material poco después de iniciar la rehidratación. En las muestras congeladas a -5 °C la

The lyophilized slices of yellow plum shed off material shortly after rehydration starts. In the samples that were frozen at -5 °C, the rehydration took 6 min, and in the ones frozen at -20 °C, 15 min. This difference is the result of long-term freezing, which creates bigger pores and weakens the structure. These results are similar to those obtained in the rehydration of lyophilized avocado (Arriola-Guevara *et al.*, 2006). The freezing temperature had a significant effect on RR in water at 30 °C, and freezing at -5 °C increased the value of RR. Similarly, the RR of the yellow plum was lower in milk (less than 3 g g⁻¹). In the case of fruits combined with cereals or used as snacks, RR should be low.

CONCLUSIONS

Freeze-drying reduces moisture and a_w of Mexican plum slices, therefore reducing the probability of microbiological contamination. The freeze-drying process alters the color, the luminosity, and the pigment retention of the Mexican plum slices. The freezing temperature and the vacuum pressure do not modify the pectin content. The lyophilized slices have high rehydration capacity, although the yellow plum sheds off small portions of material during rehydration.

—End of the English version—

Cuadro 4. Grado de rehidratación de las rodajas de ciruela (*Spondias purpurea* L.) liofilizada.
Table 4. Degree of rehydration of lyophilized plum slices (*Spondias purpurea* L.).

| Ciruela liofilizada | Tc (°C) | Pr (mbar) | Grado de rehidratación (g g ⁻¹) | | | |
|---------------------|---------|-----------|---|--------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Agua | | Leche | |
| | | | 10 °C | 30 °C | 10 °C | 30 °C |
| betabel | -5 | 0.05 | 3.46 ^a | 3.89 ^a | 2.66 ^a | 2.52 ^a |
| | -5 | 0.1 | 3.99 ^a | 3.32 ^a | 2.94 ^a | 2.71 ^a |
| | -20 | 0.05 | 3.43 ^a | 3.88 ^a | 2.82 ^a | 2.84 ^a |
| | -20 | 0.1 | 3.17 ^a | 3.32 ^a | 2.68 ^a | 2.42 ^a |
| amarilla | -5 | 0.05 | 3.62 ^a | 3.76 ^a | 2.40 ^a | 2.85 ^a |
| | -5 | 0.1 | 2.17 ^a | 2.82 ^{ab} | 1.82 ^a | 1.61 ^a |
| | -20 | 0.05 | 3.56 ^a | 1.88 ^b | 2.51 ^a | 2.62 ^a |
| | -20 | 0.1 | 2.53 ^a | 3.09 ^{ab} | 2.38 ^a | 2.04 ^a |

^{a,b} Tratamientos con letra distinta en una columna, son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). ^{a,b} Treatments with a different letter in the same column are statistically different ($p \leq 0.05$).

rehidratación tomó 6 min y 15 min en las congeladas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta diferencia se debe a que la congelación por tiempos prolongados forma poros mayores y debilita la estructura. Estos resultados son similares a los obtenidos en la rehidratación de aguacate liofilizado (Arriola-Guevara *et al.*, 2006). La temperatura de congelación tuvo efecto significativo en RR en agua a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la congelación a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ incrementó el valor de RR. Similarmente, RR de la ciruela amarilla fue menor en leche (menor a 3 g g^{-1}). En frutos que se combinen con cereales o bocadillos, es preferible que RR sea bajo.

CONCLUSIONES

La liofilización reduce la humedad y *aw* de rodajas de ciruela mexicana, lo que reduce la probabilidad de contaminación microbiológica. El color, la luminosidad y la retención de pigmentos de las rodajas de ciruela mexicana se alteran con el proceso de liofilización. La temperatura de congelación y la presión de vacío no modifican el contenido de pectina. Las rodajas liofilizadas presentan alta capacidad de rehidratación, aunque la ciruela amarilla desprende porciones pequeñas de material durante la rehidratación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Mexicano de Ciencia Tecnología (INFR-2011-3-CONACyT- Proyecto 173906) y al TecNM (5124.13-P) por otorgar el financiamiento para este proyecto.

LITERATURA CITADA

- Adhami, S., A. Rahimi, and M. S. Hatamipour. 2013. Freeze drying of quince (*Cydonia oblonga*): Modelling of drying kinetics and characteristics. *Korean J. Chem. Eng.* 30: 1201-1206.
- Alia-Tecajal, I., Y. I. Astudillo-Maldonado, C. A. Núñez-Colín, L. A. Valdez-Aguilar, S. Bautista-Baños, E. García-Vázquez, R. Ariza-Flores, y F. Rivera-Cabrera. 2012. Caracterización de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) del sur de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 21-26.
- Arriola-Guevara, E., T. García-Herrera, G. M. Guatemala-Morales, J. Nungaray-Arellano, O. González-Reynoso, y J.C. Ruíz-Gómez. 2006. Comportamiento del aguacate has liofilizado durante la operación de rehidratación. *Rev. Mex. Ing. Quim.* 5: 51-56.
- Beaudry, C., G. S. V. Raghavan, C. Ratti, and T. J. Rennie. 2004. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Dry. Technol.* 21: 1797-1810.
- Caparino, O. A., J. Tang, C. I. Nindo, S. S. Sablani, J. R. Powers, and J. K. Fellman. 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *J. Food Eng.* 111: 35-148.
- Ceballos, A. M., G. I. Giraldo, and C. E. Orrego. 2012. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *J. Food Eng.* 111: 360-365.
- Fijalkowska, A., M. Nowacka, A. Wiktor, M. Sledz, and D. Witrowa-Rajchert. 2015. Ultrasound as a pretreatment method to improve drying kinetics and sensory properties of dried apple. *J. Food Process Eng.* 39: 256-265.
- Franceschinis, L., P. Sette, C. Schebor, and D. Salvatori. 2015. Color and bioactive compounds characteristics on dehydrated sweet cherry products. *Food Bioprocess Technol.* 8: 1716-1729.
- Guiné, R. P., and M. J. Barroca. 2012. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food Bioprod. Process.* 90: 58-63.
- Guo, X., D. Han, H. Xi, L. Rao, X. Liao, X. Hu, and J. Wu. 2012. Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: a comparison. *Carbohydr. Polym.* 88: 441-448.
- Hammami, C., and F. René. 1997. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *J. Food Eng.* 32: 133-154.
- Hottot, A., J. Andrieu, and S. Vessot. 2007. Sublimation kinetics during freeze-drying of pharmaceutical protein formulation. *Dry. Technol.* 25: 753-758.
- Huang, H. W., C. P. Hsu, B. B. Yang, and C. Y. Wang. 2013. Advances in the extraction of natural ingredients by high pressure extraction technology. *Trends Food Sci. Technol.* 33: 54-62.
- Jokic, S., I. Mujic, M. Martinov, D. Velic, M. Bilic, and J. Lukinac. 2009. Influence of drying procedure on colour and rehydration characteristic of wild asparagus. *Czech J. Food Sci.* 27: 171-177.
- Kasper, J. C., and W. Friess. 2011. The freezing step in lyophilization physico-chemical fundamentals, freezing methods and consequences on process performance and quality attributes of biopharmaceuticals. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 78: 248-263.
- Kliemann, E., K. Nunes de Simas, E. R. Amante, E. P. Schwiden, R. F. Teófilo, M. M. C. Ferreira, and R. D. M. C. Amboni. 2009. Optimization of pectin acid extraction from passion fruit peel (*Passiflora edulis flavicarpa*) using response surface methodology. *Int. J. Food Tech.* 44: 476-483.
- Liapis, A. I., and R. Bruttini. 2006. Freeze drying. *In: Mujundar, A. (ed). Handbook of Industrial Drying.* CRC Press, Boca Raton, pp: 257-281.
- Lombraña, J. I. 2009. Fundamentals and tendencies in freeze-drying of foods. *In: Ratti, C. (ed). Advances in Food Dehydration.* CRC Press, Boca Raton, US, pp: 209-213.
- Lozano-Acevedo, A., M. Jiménez-Fernández, A. Ragazzo-Sánchez, G. R. Urrea-García, and G. Luna-Solano. 2011. Fluidized bed drying process of thinly sliced potato (*Solanum tuberosum*). *Am. J. Pot. Res.* 88: 360-366.
- Marín, B. E., M. R. Lemus, M. V. Flores, y G. A. Vega. 2006. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Rev. Chil. Nutr.* 33: 527-538.

- Marques, L. G., M. C. Ferreira, and J. T. Freire, 2007. Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.) Chem. Eng. Process. 46: 451-457.
- Naghshineh, M., K. Olsen, and C. A. Georgiou. 2013. Sustainable production of pectin from lime peel by high hydrostatic pressure treatment. Food Chem. 136: 472-478.
- Osuna, G. J. A., B. M. H. Pérez, V. V. Vázquez, y J. R. Gómez. 2011. Aplicación de 1-metilciclopropeno (1-MCP) y su efecto en ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) Rev. Fitotec. Mex. 34: 197-204.
- Pei, F., Y. Shi, A.M. Mariga, W. J. Yang, X.Z. Tang, L. Y. Zhao, X. X. An, and Q. H. Hu. 2014. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. Food Bioprocess Technol. 7: 1629-1639.
- Reyes, A., R. Vega, R. Bustos, and C. Araneda. 2008. Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. Dry. Technol. 26: 1272-1285.
- Reyes, A., A. Mahn, and P. Huenulaf. 2011. Drying of apple slices in atmospheric and vacuum freeze dryer. Dry. Technol. 29: 1076-1089.
- Sánchez-Santillán, P., M. A. Cobos-Peralta, D. Hernández-Sánchez, A. Alvarado-Iglesias, D. Espinosa-Victoria, y J. G. Herrera-Haro. 2016. Uso de carbón activado para conservar bacterias celulolíticas liofilizadas. Agrociencia 50: 575-582.
- Shih, C., Z. Pan, T. McHugh, D. Wood, and E. Hirschberg. 2008. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries. Transactions ASABE. 51: 205-216.
- Shishegarha, F., J. Makhlof, and C. Ratti. 2002. Freeze-drying characteristics of strawberries. Dry. Technol. 20: 131-145.
- SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquera). Ciclos: Cíclicos y perennes 2015. www.siap.gob.mx (Consulta: mayo 2016).
- Vargas-Simón, G., R. Hernández-Cupil, y E. Moguel-Ordoñez. 2011. Caracterización morfológica de ciruela (*Spondias purpurea* L.) en tres municipios del estado de Tabasco, México. Bioagro 23: 141-149.
- Xi, J. 2009. Caffeine extraction from green tea leaves assisted by high pressure processing. J. Food Eng. 94: 105-109.
- Zhang, L., T. Liu, Y. Xue, C. Liu, H. Ru, M. Dong, and Z. Yu. 2015. Effects of drying methods on the aroma components and quality of *Capsella Bursa-Pastoris* L. J. Food Process Eng. 39: 107-120.